

国内外应力环测试设备的发展与现状

赵 帅 毕雅萱

(鹤壁职业技术学院, 河南 鹤壁 458030)

摘 要 本文首先分析了金属材料的失效带来的危害, 引出应力环设备的应用范围, 指出硫化物应力腐蚀破坏的三种主要形式, 以及研发应力环设备的必要性; 其次通过介绍国内外应力环测试设备生产商, 如美国 CORTEST、芬兰 Cormet 公司、我国宝山钢铁股份有限公司, 分析了各种不同应力环的结构特点、功能原理、测试环境等优缺点; 最后指出了研制用于应力腐蚀试验的应力环设备对我国制造装备行业转型升级具有重要意义。

关键词 应力腐蚀 测试设备 应力环

中图分类号: TG14

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)12-0001-03

众所周知, 金属材料的失效形式主要是摩擦、腐蚀和断裂三种方式。而金属零件在成型及使用过程中不可避免地受到各种因素影响而产生应力, 如切削加工的残余应力, 受冷热冲击、外载荷作用而产生的内应力等。当零件受到应力不超过许用应力, 零件一般不会失效; 但是当零件在不同的工况条件下使用时, 受到环境因素(如潮湿、酸性、碱性、海水等)影响会产生腐蚀现象, 在应力和腐蚀的双层因素作用下, 零件会产生应力腐蚀裂纹而加速失效, 从而影响零件和设备的正常使用。

1 应力环设备的应用范围

早在 20 世纪 50 年代, 暴露于油田环境中的材料所产生的硫化氢应力腐蚀(SSC)就被公认为是一种材料破坏问题, 如炼油装置中的一些零件在高温下会产生 SCC 现象。根据实验数据和实际经验表明, 浓度很低的 H_2S 也会导致敏感材料的 SSC 破坏; 在一些情况下, H_2S 可能与氯化物协同作用产生腐蚀和开裂的 SCC 现象。除高低温硫化氢环境中产生的 SCC、SSC 破坏, 硫化氢处于酸性环境中还可能还存在其他类型破坏, 如氢鼓泡、氢致裂纹(HIC)、坑蚀等。例如, 氢脆(HE)引起的室温下 SSC 破坏^[1-2]; 钢材质的管道、压力容器在潮湿硫化氢环境下吸氢腐蚀而产生开裂等^[3]。

在实验室条件下的应力腐蚀破坏形式主要是:

1. 硫化物应力腐蚀开裂(SSCC): 硫化氢产生的氢原子通常会首先渗透到零件的内部, 溶解于金属晶格中, 导致零件脆性, 当在外加拉应力或残余应力作用下形成腐蚀开裂。其应力腐蚀开裂通常发生于金属

焊缝与热影响区的高硬度区。

2. 氯化物应力腐蚀开裂: 开裂由 Cl^- 诱发产生, S^{2-} 的存在对 Cl^- 有促进作用, 加速金属的腐蚀。

3. 氢致开裂(HIC): 通过分析低合金高强度钢在湿硫化氢环境中开裂机理的研究, 湿硫化氢引起的氢致开裂一般有以下几种形式: (1) 氢鼓泡(HB) 钢材在硫化氢腐蚀作用下, 在表面的水分子中产生大量氢原子, 析出的氢原子与钢材内部反应, 在缺陷部位(如蚀坑、位错、杂质、夹杂界面等)聚集, 结合成氢分子。与氢原子相对, 氢分子所占据的空间为原来的 20 倍, 因此导致钢材内部形成很大的内压, 即钢材内部产生的内应力, 使得钢材的脆性增加。当内部压力达到 103MPa~104MPa (10.4atm~10.5atm) 时, 引起晶界面开裂, 在金属内部形成氢鼓泡。这种现象发生于钢中夹杂物与其他的冶金不连续处, 且氢鼓泡的发生并不需要外加应力, 经常分布平行于钢板表面。(2) 氢致开裂(HIC) 在发生氢鼓泡的钢内部区域, 随着氢的压力进一步增高, 小的鼓泡裂纹趋向于相互连接, 从而形成有阶梯状特征的氢致开裂。钢中硫化锰的夹杂, 也增加了 HIC 的敏感性, 且 HIC 的发生也不需要施加外应力。(3) 应力导向氢致开裂(SOHIC) 在应力作用下, 在夹杂物与缺陷处区域, 因氢聚集而导致成排的小裂纹形成, 沿着垂直于应力的方向发展, 即向压力容器与管道的壁厚方向发展。SOHIC 常发生在焊接接头的热影响区及高应力集中区。应力集中常为应力腐蚀裂纹或裂纹状缺陷所引起。

因此, 硫化氢环境下的应力环测试系统, 能够在

★基金项目: 鹤壁职业技术学院 2021 年度校本重点课题(2021-KJZD-003); 2023 年度河南省高等学校重点科研项目(23B460029)。

实验室对石油管道、压力容器等材料进行相应的 EC 试验,更加简便、有效地了解材料的抗 EC 能力^[4]。此外,应力环测试设备还可以获取航空航天、海运船舶、食品加工、焊接密封等各类材料在各种酸、碱腐蚀环境下的腐蚀效应数据,并能准确反应材质的抗载荷能力^[5],为改进各种专业和特殊金属材料提供科学依据,对于开发更高强度、抗 EC 的材料具有重要意义。

2 国外应力环设备的发展现状

美国 CORTEST 应力环测试系统^[6](PROOF RING TEST SYSTEM)自 1977 年 NACE TM 01-77 颁布以来,已成为标准工业产品。CORTEST 应力环是为满足 NACE 标准而专门设计的,针对性高,并选用优质特种材料,正常情况下可以无数次地反复使用。

CORTEST 应力环测试系统结构,如图 1 所示,主要包括:应力环、耐热有机玻璃容器、高温容器、12.6 型温度控制器、定时控制器、气体分配器等,能够实现恒应力拉伸试验、高温蠕变试验和 1/2CT 试样裂纹生长速度测量试验。具有以下特点:符合 NACE TM 01-77 试验规范;载荷范围宽,最大 OMPa~1700MPa;载荷线性度 ≥ 0.9999 ;弹性形变还原性高,保证 5 年内误差小于 2%;第三方权威机构校正并出具报告;PLC 自动定时系统,可靠性高。



图 1 CORTEST 应力环测试系统

该公司还开发了 40 通道集成式应力环测试系统,专门针对冶金、石油等大规模应用领域而开发的产品。作为一种一体化设计系统,省去了用户为应力环配置实验室外围设备的诸多繁杂工作。该系统由温控式应

力环、气体控制单元、定时控制单元、温度控制单元、计算机数据处理系统、循环水系统、H₂S 检测/报警装置、通风试验橱柜等部分组成。具有准确性、长期稳定性、安全性、便利性等特点。在应力腐蚀检验方面发挥着重要的作用,在国际市场具有广泛的应用。

芬兰 Cormet 公司是欧洲最主要的腐蚀试验室仪器生产商,其生产的应力环应用于圆棒试样测试的恒载荷设备^[7],主要用于检测应力腐蚀、硫应力腐蚀和氢腐蚀,常用于研究金属件在单向拉伸载荷作用下的抗腐蚀性能。通过对拉伸试样加载特定的应力来判断该试样是否符合标准,判断依据可以用失效时间来定量判断。这种设备基于国际标准 NACE-TM0177-2005《H₂S 环境中金属抗硫化物应力开裂和应力腐蚀开裂的室内试验》中的测试方法 A 设计制造。载荷范围:10kN~20kN;20kN~38kN,载荷传感器,实时显示载荷力,分辨率为 1N。应力环带有温度控制配件,冷却、加热循环系统,通过试验池内的哈氏合金管路进行热传递,试验池内装有温度传感器,时刻监测池内温度。

3 国内应力环设备的发展现状

目前,国产应力环测试系统还未发现有大规模生产、应用,具有硫化氢应力腐蚀检测业务第三方检测机构大多采用国外应力环。根据 NACE TM 01-77 和 GB/T 4157-2006 可知,应力腐蚀是一个较为缓慢过程,以上标准是苛刻的加速试验方法;对环境条件、试剂纯度、试验容器和相关装置有着较高的要求,针对不同被测材料的性能和影响因素其试验方法、评价方式也不尽相同,要求试验设备要有针对性。但我国企业和高校近年来对于硫化氢环境下的应力腐蚀的原理(如电化学腐蚀)、慢应变加载及载荷、变形测量、系统开发也进行了大量研究,并取得了一定的成果,具有一定的指导意义。

宝山钢铁股份有限公司^[8]自主开发了一款应力环,该产品用于高温高压含有毒有害气体环境恒载荷应力腐蚀试验,采用高合金不锈钢,不同温度下的载荷线性度大于 0.98;产品尺寸:轴向厚度 5mm~35mm,内径 40mm~100mm,壁厚 5mm~15mm。该公司与上海宝山工业检测公司分别对应力环加载过程中试样的定位和防扭转进行了研究,并提出了相应的解决方案。

在此基础上,宝山钢铁股份有限公司又进行了新的机构改进^[9],在对油井管材质试样实施硫化物应力腐蚀开裂试验时,无须频繁地抽取试验罐中的试验溶液来做测试,只需通过笔记本电脑观察溶解氧电极、硫化氢电极、pH 值电极和温度电极测得的数据即可。这样在试验过程中,试验罐始终处于封闭状态,从而避



图2 BPR-20 应力环测试设备

免了试验罐中的试验溶液与外部空气接触,使得试验溶液成分不会受外部空气的影响,进而保证了试验结果的准确性。同时也保证了试验罐内有足够的试验溶液和试验结果的准确性。另外,由于无须人工抽取试验溶液,从而大大降低了试验人员接触试验溶液中的有毒硫化氢气体的概率,有效保障了试验人员的人身安全。

上海百若试验仪器有限公司研发的 BPR-20 应力环测试系统^[10],主要应用于苛刻环境下的应力腐蚀试验,可准确了解材料的抗载荷能力,能够为研究各专业材料和特殊金属材料提供科学依据。该设备主要由底座、挠度测量装置、应力环、试验釜、温度及定时控制器等部件组成,如图2所示,具有结构精巧、线性度高、加载稳定准确、实验数据可靠、使用寿命长等特点。能够满足试验对环境条件、试剂纯度、试验容器及相关配置的要求,其载荷线性度高 $\geq 99.95\%$;环体弹性形变还原性高,可长时间使用误差小于2%。

上海交通大学的研究人员设计研发了应力环自动加载装置^[11],通过控制步进电动机带动同步带传动机构将动力传递到滚珠丝杠螺母并驱动滚珠丝杠转动,使加压套件与应力环接触并保持此状态不变。滚珠丝杠螺母继续驱动溜板及压力传感器向下运动,直至压力传感器与加压套件相接触,并对应力环施加载荷。该机构能够加载负荷0kN~40kN,实现了抗硫化氢腐蚀测试的压力环自动化加载,具有加载快速平稳、定位准确、可靠性高、省时高效、实用性强等特点,可以满足一系列抗硫化氢应力腐蚀测试的压力环加载需要。

4 总结

应力腐蚀开裂试验是钢铁、管道生产企业必须进行的一种试验,用于验证所生产产品对硫化物的敏感

程度,对生产企业安全、经济都有着十分巨大的影响。因此,开发高精度应力环测试系统装置,摆脱我国对国外设备和技术的依赖,提高应力环测试系统设备国产化率,对我国制造业转型升级具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张挺,赵睁,倪莉,等.高强度螺栓氢脆问题研究[J].全面腐蚀控制,2016,30(07):28-32.
- [2] 罗洁,郭正洪,戎咏华.先进高强度钢氢脆的研究进展[J].机械工程材料,2015,39(08):199-201.
- [3] 赵华莱,姜放,李珣,等.C型环试验的加载应力计算[J].天然气与石油,2007,25(02):21-24,32.
- [4] 付洋洋.应力环的设计制备及其在18CrNiMo7-6钢氢致断裂研究中的应用[D].北京:机械科学研究总院,2018.
- [5] 张婷婷,陆春辉.抗硫化物应力腐蚀试验方法的改进[J].宝钢技术,2016(03):63-66.
- [6] 应力环-科泰斯特(北京)商贸有限公司[DB/OL].www.cortest.com.cn.
- [7] 应力腐蚀试验-广州易安达腐蚀科技有限公司[DB/OL].www.yntchina.com.
- [8] 宝山钢铁股份有限公司.高温高压含有毒有害气体环境用恒载荷应力环制造方法[P].中国专利:103506809A,2014.01.15.
- [9] 宝山钢铁股份有限公司.适用于应力环试验中的防试件扭曲装置[P].中国专利:200944089Y,2007.09.05.
- [10] 上海百若试验仪器有限公司[DB/OL].www.bairoe.com.
- [11] 上海交通大学.应力环自动加载装置[P].中国专利:101793653A,2010.08.04.